

Contrôleur à commutation pour l'asservissement visuel 2D

Guillaume Allibert * Estelle Courtial **

* *Laboratoire I3S UNS-CNRS, Sophia Antipolis, France*
Allibert@i3s.unice.fr

** *Laboratoire PRISME EA 4229, Université d'Orléans, France*
Estelle.Courtial@univ-orleans.fr

Résumé : L'asservissement visuel 2D (AV2D) utilise très souvent comme information visuelle de retour, les coordonnées cartésiennes de points dans l'image. Cette approche classique permet généralement de satisfaire les objectifs de commande. Cependant, dans certaines configurations, des déplacements 3D inutiles peuvent être constatés. Ce désagrément peut être pallié en utilisant une approche d'AV2D basée sur les coordonnées polaires des points. Dans ce papier, on propose un contrôleur à commutation qui permet de profiter des avantages de chacune des approches et d'améliorer ainsi les performances de l'AV2D. L'étude de stabilité est menée et les contraintes de visibilité sont prises en compte. Des simulations illustrent l'efficacité et la robustesse de l'approche proposée.

Mots-clés: Asservissement visuel, contrôleur à commutation

1. INTRODUCTION

L'asservissement visuel est une stratégie de commande efficace pour contrôler les mouvements d'un système robotique en utilisant des informations visuelles Chaumette et Hutchinson (2006). On distingue différentes approches en fonction du type d'information en retour : l'asservissement visuel 2D où l'information de retour est définie dans le plan image, l'asservissement visuel 3D (AV3D) qui se base sur une image pour reconstruire une information 3D telle que la pose du système robotique, et les asservissements hybrides qui combinent des informations 2D et 3D. Un autre point de différenciation est le type de primitives visuelles utilisées : points, droites, moments. Dans cette étude, on considère uniquement des primitives visuelles de type point. En AV2D, l'objectif de commande est de faire tendre un signal d'erreur mesuré dans l'image vers zéro. Puisqu'il ne nécessite pas de reconstruction 3D, l'AV2D est une stratégie robuste vis à vis des bruits de mesure, des erreurs de modélisation et sa mise en œuvre est facile. Cependant, aucun contrôle n'est fait sur la pose de la caméra. Par conséquent, des déplacements 3D inutiles sont parfois constatés et peuvent conduire à l'arrêt de la loi de commande. Pour pallier cet inconvénient, des solutions ont été proposées en utilisant des primitives visuelles plus complexes Chaumette (2004), une planification de trajectoire 3D, des commandes LMI Chesi et Vicino (2004), des asservissements hybrides Chaumette et Hutchinson (2007), Une autre solution proposée se base sur un système de commutation entre l'AV2D et l'AV3D pour profiter de la complémentarité des deux approches puisqu'en AV3D la trajectoire de la caméra est rectiligne dans l'espace 3D Gans et Hutchinson (2007). La commutation vers l'une ou l'autre approche est réalisée lorsque l'erreur dans le plan image ou dans l'espace 3D est considérée trop grande. Cette approche reste sujette aux problèmes de singularités. De même, Deng et al. (2005) propose un

contrôleur hybride AV2D/AV3D afin d'éviter les singularités, les minima locaux et la perte de la cible dans le champ de vue de la caméra. Dans tous les cas, l'AV3D nécessite la connaissance d'un modèle 3D précis de la cible et se révèle sensible aux erreurs de traitement d'images lorsque des primitives de type point sont utilisées pour reconstruire la pose. Afin de s'affranchir des problèmes liés à la reconstruction 3D, une approche d'AV2D basée sur la paramétrisation cartésienne et polaire de points dans l'image a été proposée dans Corke et al. (2009). Dans ce cas, le contrôleur hybride est obtenu en concaténant les matrices d'interaction cartésienne et polaire pour un même point. Les résultats sont donc une moyenne des performances obtenues avec la paramétrisation cartésienne et polaire. De plus, la visibilité des cibles n'est pas garantie. Dans ce papier, on propose un contrôleur à commutation qui permet de préserver le comportement optimal de chacun des contrôleurs. La principale difficulté consiste alors à déterminer à quel instant la commutation doit être faite vers tel ou tel contrôleur. Le signal de commutation dépend des mesures dans l'image à l'instant courant et de critères. Ces derniers sont basés sur la prédiction du mouvement effectué par la caméra pour aller de la position courante à la position désirée, sans aucune information 3D. De plus, la cible est maintenue dans le champ de vue de la caméra.

Le papier est organisé de la façon suivante. La section II rappelle les stratégies d'AV2D basées sur des informations cartésiennes (notée $AV2D_C$) ou polaires (notée $AV2D_P$). Les avantages et les inconvénients de chaque approche sont détaillés. Dans la section III, le contrôleur à commutation proposé est présenté. La stabilité du système bouclé est prouvée et les contraintes de visibilité sont prises en compte. Dans la section IV, des simulations montrent l'efficacité et la robustesse de l'approche en présence de bruits et d'erreurs de modélisation.

2. AV2D CARTÉSIEN ET POLAIRE

L'objectif de l'asservissement visuel 2D est de réguler vers zéro une erreur dans l'image, définie entre la valeur courante de primitives visuelles s et leurs valeurs désirées s^* . La valeur courante des primitives est obtenue par des mesures dans l'image et sont généralement des coordonnées pixeliques d'un ensemble de n points ($n \geq 3$). Dans la suite, les développements théoriques sont donnés pour un point.

2.1 Coordonnées cartésiennes

Soit P un point 3D avec (X, Y, Z) ses coordonnées dans le repère de la caméra où l'axe Z_c de la caméra est perpendiculaire au plan image. Ce point P se projette en un point s_c dans le plan image, dont les coordonnées normalisées (u, v) sont données par :

$$s_c = (u, v) = \left(\frac{X}{Z}, \frac{Y}{Z}\right). \quad (1)$$

La dérivée temporelle de (1) permet d'écrire la relation fondamentale de l'AV2D_C :

$$\dot{s}_c = L_{s_c} \tau \quad (2)$$

où $L_{s_c} \in \mathbb{R}^{2 \times 6}$ est la matrice d'interaction et $\tau = [T_x, T_y, T_z, w_x, w_y, w_z] \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$ est le torseur cinématique de la caméra. Pour un point exprimé en coordonnées cartésiennes dans l'image, la matrice d'interaction s'écrit Chaumette et Hutchinson (2006) :

$$L_{s_c} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{Z} & 0 & \frac{u}{Z} & uv & -(1+u^2) & v \\ 0 & -\frac{1}{Z} & \frac{v}{Z} & -uv & -u & 1+v^2 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

On constate que L_{s_c} dépend de Z qui est la profondeur du point par rapport au repère caméra (i.e. la distance le long de l'axe optique). Cette valeur, rarement mesurée, est estimée ou approchée. Elle sera notée \hat{Z} dans la suite. L'objectif de commande consiste à faire décroître exponentiellement l'erreur dans l'image :

$$\dot{e}_c = -\lambda e_c \quad \text{avec } e_c = s_c - s_c^* \quad \text{et } \lambda > 0 \quad (4)$$

où s_c^* représente les coordonnées cartésiennes désirées du point image. En combinant (2) et (4), on obtient la loi de commande classique :

$$\tau = -\lambda \widehat{L_{s_c}}^+ e_c \quad (5)$$

où $\widehat{L_{s_c}}^+$ est la pseudo-inverse de la matrice d'interaction évaluée avec la profondeur estimée ou approchée \hat{Z} .

Avec cette paramétrisation cartésienne, les trajectoires obtenues dans le plan image tendent vers des lignes droites. De plus, due à l'expression particulière de la matrice d'interaction (3), le contrôleur AV2D_C est bien adapté aux déplacements en translation. En effet, les translations de la caméra le long des axes X et Y sont invariantes aux variations des points dans l'image, respectivement le long des axes u et v , comme on peut le constater sur la première et la seconde colonne de (3). Par contre, dans le cas d'une rotation pure autour de l'axe optique, le mouvement de la caméra est composé d'une rotation mais également d'une translation le long de l'axe optique. Ce phénomène est connu sous la dénomination anglaise de *camera retreat* Chaumette (1998). Ce déplacement inutile est dû au couplage entre la troisième et la sixième colonne de (3).

En résumé, le contrôleur AV2D_C est généralement efficace mais dans certains cas, il peut générer des déplacements inutiles de la caméra.

2.2 Coordonnées polaires

Les coordonnées d'un point image peuvent également être exprimées en coordonnées polaires Iwatsuki et Okiyama (2002) :

$$s_p = (\rho, \theta) = (\sqrt{u^2 + v^2}, \text{atan}(\frac{v}{u})) = \phi_{cp}(s_c) \quad (6)$$

où ρ est le rayon et θ l'angle. Comme précédemment, la dérivée temporelle de (6) :

$$\dot{s}_p = L_{s_p} \tau, \quad (7)$$

combinée à la décroissance exponentielle de l'erreur dans le plan polaire fournit la loi de commande :

$$\tau = -\lambda \widehat{L_{s_p}}^+ e_p. \quad (8)$$

$L_{s_p} \in \mathbb{R}^{2 \times 6}$ est la matrice d'interaction dont l'expression pour un point en coordonnées polaires est donnée par Chaumette et Hutchinson (2007) :

$$L_{s_p} = \begin{bmatrix} \frac{c}{\bar{Z}_s} & \frac{s}{\bar{Z}_c} & -\frac{\rho}{\bar{Z}} & -(1+\rho^2)s & (1+\rho^2)c & 0 \\ -\frac{c}{\rho\bar{Z}} & -\frac{s}{\rho\bar{Z}} & 0 & -\frac{c}{\rho} & -\frac{s}{\rho} & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

avec $c = \cos\theta$ et $s = \sin\theta$.

$\widehat{L_{s_p}}^+$ est la pseudo-inverse de L_{s_p} évaluée avec \hat{Z} . L'erreur dans l'image est donnée par $e_p = s_p \ominus s_p^*$ où \ominus est une soustraction modulo 2π pour la partie angulaire.

Remarque : La représentation polaire présente une singularité pour le point $(u, v) = (0, 0)$. On peut alors utiliser les coordonnées (ρ, θ) pour s'affranchir de cette singularité Iwatsuki et Okiyama (2002).

Avec la paramétrisation polaire, les trajectoires des primitives visuelles tendent vers des lignes droites dans le plan polaire mais plus dans le plan cartésien. On peut constater, d'après la matrice d'interaction (9), que les rotations autour de l'axe optique sont invariantes à ρ ($L_{s_p}(1, 6)$) et directement proportionnelles à θ ($L_{s_p}(2, 6)$). Par ailleurs, les translations T_z sont invariantes à θ . Cela explique pourquoi le déplacement effectué dans le cas d'une rotation pure autour de l'axe optique est très satisfaisant et présente aucun déplacement supplémentaire. Par contre, les translations le long des axes X et Y apportent des déplacements inutiles de la caméra.

Afin de profiter au mieux des avantages inhérents à chaque type de contrôleurs et améliorer ainsi les performances de l'AV2D, un contrôleur à commutation (switching controller en anglais), noté AV2D_S, a été développé.

3. CONTRÔLEUR À COMMUTATION POUR L'AV2D

La structure de contrôle permettant de sélectionner, grâce à un signal de commutation, soit le contrôleur AV2D_C soit le contrôleur AV2D_P est représentée Fig. 1. La prise de décision se fait en fonction de la mesure courante des primitives visuelles et de critères, explicités ci-après.

3.1 Loi de commande

Comme mentionné précédemment, les contrôleurs AV2D_C et AV2D_P peuvent générer des déplacements inutiles de la caméra dans certaines configurations.

Le contrôleur proposé doit donc être capable de commuter d'un contrôleur à l'autre afin de minimiser, voire supprimer

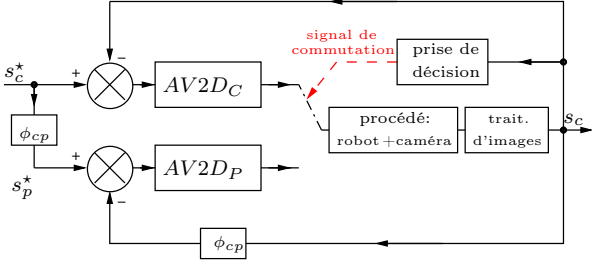


FIGURE 1. Structure du contrôleur à commutation

ces déplacements parasites, et ainsi améliorer les performances de l'AV2D. Si le déplacement à réaliser est une translation pure, le contrôleur $AV2D_C$ doit être choisi. De façon similaire, le contrôleur $AV2D_P$ doit être sélectionné si le déplacement à effectuer est une rotation pure autour de l'axe optique. Dans le cas où la caméra doit réaliser un déplacement quelconque, se pose alors le problème de déterminer les instants de commutation appropriés. Le contrôleur $AV2D_S$ doit donc assurer la convergence des primitives désirées tout en minimisant le déplacement induit de la caméra. Sachant que les erreurs images dans le plan cartésien et dans le plan polaire n'ont pas les mêmes échelles, elles ne peuvent pas être comparées. La seule information commune aux deux contrôleurs est une information 3D, à savoir le déplacement de la caméra. Pour déterminer le contrôleur le plus adéquat, une prédiction de la trajectoire de la caméra jusqu'à la position désirée est faite pour les deux contrôleurs. Pour cela, il faut tout d'abord prédire l'évolution des primitives visuelles dans le plan image pour les deux contrôleurs Allibert et al. (2010). Le modèle de prédiction est basé sur les équations dynamiques (2) (resp. (7)) discrétisées à l'ordre 1 et où $\hat{Z} = Z^*$ est la profondeur à la position désirée :

$$s_c(k+1) = s_c(k) + T_e \widehat{L_{s_c(k)}} \tau(k) \quad (10)$$

$$s_p(k+1) = s_p(k) + T_e \widehat{L_{s_p(k)}} \tau(k) \quad (11)$$

avec T_e la période d'échantillonnage.

Remarque : Basée sur l'expression de la matrice d'interaction, les modèles de prédiction ont un domaine de validité local. A l'instar de Folio et Cadenat (2008), nous n'avons pas rencontré de problèmes pour des configurations nécessitant des déplacements importants.

En considérant que l'on peut grossièrement approcher, à chaque itération, le déplacement de la caméra à la quantité $T_e \sqrt{T_x^2 + T_y^2 + T_z^2}$, on peut alors calculer une image de la trajectoire de la caméra pour passer de sa position courante à sa position désirée. L'algorithme développé est détaillé ci-dessous dans le cas de l' $AV2D_C$. C'est la même procédure pour l' $AV2D_P$: il suffit de changer l'indice ' C ' en ' P '.

Algorithme de prédiction de la trajectoire de la caméra :

- (1) A l'instant courant $k, i = 0$;
- (2) Mesure de $s_c(k+i)$,
- (3) Mise à jour de $e_c(k+i) = s_c(k+i) - s_c^*$ et de $\widehat{L_{s_c(k+i)}}$,
- (4) Calcul de $\tau(k+i) = -\lambda \widehat{L_{s_c(k+i)}}^+ e_c(k+i)$,
- (5) Calcul de $d_c(k+i) = T_e \sqrt{T_{x(k+i)}^2 + T_{y(k+i)}^2 + T_{z(k+i)}^2}$,
- (6) Prédiction de $s_c(k+i+1) = s_c(k+i) + T_e \widehat{L_{s_c(k+i)}} \tau(k+i)$

- (7) Si $e_c(k+i+1) = s_c(k+i+1) - s_c^* < \beta_c$ alors STOP sinon $i = i+1$ retour à l'étape 3.

β_c est une constante de faible valeur, réglée en fonction de la précision souhaitée. Le temps correspondant à $e_c(k+i+1) = s_c(k+i+1) - s_c^* < \beta_c$ est noté $(k+f_c)$. Cette procédure de prédiction est répétée à chaque instant d'échantillonnage après l'acquisition de nouvelles mesures. On définit deux critères respectivement pour le contrôleur $AV2D_C$:

$$J_c = \sum_{j=k}^{k+f_c} d_c(j), \quad (12)$$

et pour le contrôleur $AV2D_P$:

$$J_p = \sum_{j=k}^{k+f_p} d_p(j). \quad (13)$$

Remarque : Les gains λ , fixant la vitesse de décroissance de l'erreur, n'ont aucune influence sur J_c et J_p . Les critères dépendent uniquement de la trajectoire et sont donc indépendants de la vitesse à laquelle les trajectoires sont parcourues.

Dans le cas où $J_c > J_p$, le contrôleur $AV2D_P$ est sélectionné et vice versa. Il est important de noter que lorsque les erreurs dans l'image deviennent faibles, les trajectoires des primitives dans l'image et celle de la caméra dans l'espace 3D sont sensiblement les mêmes quel que soit le contrôleur choisi. Afin d'éviter de nombreuses commutations entre les deux contrôleurs, un comparateur à hystérésis a été inséré dans la procédure de prise de décision (voir Fig. 2). Si le contrôleur $AV2D_C$ (resp. $AV2D_P$) est utilisé à l'instant précédent, le contrôleur $AV2D_P$ (resp. $AV2D_C$) sera utilisé à l'itération suivante si et seulement si :

$$J_p - J_c > T^- \quad (\text{resp. } J_p - J_c < T^+). \quad (14)$$

Le paramètre T est réglé par simulation. Au final, les différentes étapes nécessaires à la prise de décision, et par conséquent à la génération du signal de commutation, sont décrites sur la Fig. 2. La procédure de prise de décision est effectuée à chaque instant d'échantillonnage.

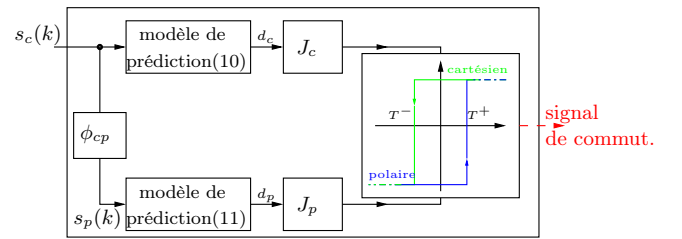


FIGURE 2. Représentation schématique de la prise de décision

3.2 Contraintes de visibilité

Une des difficultés majeures de l'asservissement visuel est de garantir que les primitives visuelles restent dans le champ de vue de la caméra sinon la loi de commande s'arrête. Cette garantie de voir la cible à tout moment est appelée contrainte de visibilité. Grâce aux découplages des erreurs, le contrôleur $AV2D_C$ permet de générer des lignes droites dans l'image si \hat{Z} est parfaitement estimée. La visibilité des cibles est alors implicitement garantie. Le problème de visibilité peut apparaître lorsque

le contrôleur $AV2D_P$ est utilisé. En effet, à des lignes droites dans le plan polaire peuvent correspondre des trajectoires circulaires dans le plan cartésien pouvant entraîner une perte de visibilité des primitives (Fig. 3). Pour pallier ce problème, on regarde si les prédictions des primitives visuelles $s_p(k+1)$ et/ou $s_p(k+2)$ sont proches d'une zone de sécurité définie préalablement dans le plan image. Si c'est le cas, on commute instantanément sur le contrôleur $AV2D_C$, et ce pendant N itérations. Une fois les N itérations passées, la procédure de prise de décision est relancée. Dans la suite, la valeur de N est fixée à 10, évitant ainsi des commutations intempestives.

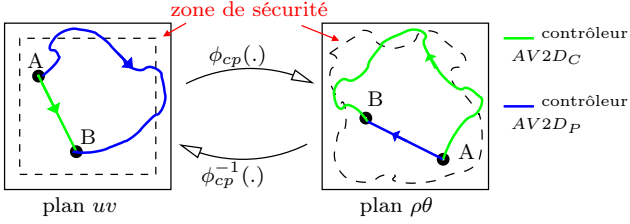


FIGURE 3. Contraintes de visibilité

3.3 Étude de la stabilité

La stabilité du système bouclé avec la commande classique (5) ou (8) a largement été étudiée. La stabilité asymptotique locale est prouvée pour les deux contrôleurs Chaumette et Hutchinson (2006). La stabilité du système bouclé avec le contrôleur $AV2D_S$ est quant à elle beaucoup plus difficile à prouver, spécialement dans le cas où le signal de commutation est quelconque Liberzon (2003). Cela nécessite la stabilité individuelle des deux contrôleurs mais également de trouver une fonction de Lyapunov commune aux deux contrôleurs.

Proposition : quel que soit le signal de commutation, le système bouclé (Fig.1) est localement asymptotiquement stable avec le contrôleur $AV2D_S$.

Preuve : une condition nécessaire est, avant tout, que chaque sous système soit individuellement stable. Soit le sous-système composé du contrôleur $AV2D_C$. Soit V_c une fonction de Lyapunov candidate :

$$V_c = \frac{1}{2} e_c^T e_c, \quad (15)$$

on obtient :

$$\dot{V}_c = e_c^T \dot{e}_c = e_c^T L_{s_c} \tau = -\lambda e_c^T L_{s_c} \widehat{L}_{s_c}^+ e_c. \quad (16)$$

La stabilité asymptotique (resp. locale) est garantie si la matrice $L_{s_c} \widehat{L}_{s_c}^+$ est définie positive ($n = 3$) (resp. semi-définie positive ($n > 3$)). De la même manière, la stabilité du sous-système composé du contrôleur $AV2D_P$ (8) peut être prouvée. Soit V_p une fonction de Lyapunov candidate :

$$V_p = \frac{1}{2} e_p^T e_p, \quad (17)$$

on obtient :

$$\dot{V}_p = e_p^T \dot{e}_p = e_p^T L_{s_p} \tau = -\lambda e_p^T L_{s_p} \widehat{L}_{s_p}^+ e_p. \quad (18)$$

La définie (semi-définie) positivité de $L_{s_p} \widehat{L}_{s_p}^+$ garantit la stabilité asymptotique (locale).

La prochaine étape consiste à trouver une fonction de

Lyapunov commune aux deux sous-systèmes. Si une telle fonction existe, la stabilité du système bouclé est alors assurée pour un signal quelconque de commutation. Soit g , une application entre l'erreur image définie dans le plan polaire et l'erreur image définie dans le plan cartésien :

$$g : \mathbb{R}^{2 \times n} \rightarrow \mathbb{R}^{2 \times n} \\ e_p \mapsto e_c = g(e_p), \quad g(0) = 0. \quad (19)$$

Il est facile de montrer que $V_c = 0$ si et seulement si $e_c = 0$ ou $e_p = 0$ et $V_c = 1/2 \|e_c\|^2 = 1/2 \|g(e_p)\|^2 > 0$. Nous avons vu précédemment que V_c est une fonction décroissante pour le contrôleur $AV2D_C$. Dans le voisinage de l'origine, l'application g est injective et on peut écrire un développement limité de Taylor autour de $e_p = 0$:

$$g(e_p) = g(0) + \frac{dg}{de_p} \big|_{e_p=0} e_p + o_2 = G e_p + o_2 \quad (20)$$

où le jacobien $G = dg/de_p \big|_{e_p=0}$ est de rang plein et o_2 sont des termes de degré 2 et supérieur. En combinant (15) et (20), on obtient :

$$V_c = \frac{1}{2} e_p^T G^T G e_p + o_2. \quad (21)$$

En considérant (7) et (8), la dérivée temporelle de (21) s'écrit alors :

$$\dot{V}_c = -\lambda e_p^T G^T G L_{s_p} \widehat{L}_{s_p}^+ e_p. \quad (22)$$

La fonction V_c est une fonction décroissante pour le contrôleur $AV2D_P$ si la matrice $L_{s_p} \widehat{L}_{s_p}^+$ est définie (semi-définie) positive. La fonction candidate V_c est alors une fonction de Lyapunov commune aux deux contrôleurs. Par conséquent, le système bouclé avec le contrôleur $AV2D_S$ est stable pour tout signal de commutation. ■

4. SIMULATIONS

On souhaite positionner une caméra perspective à 6 degrés de liberté par rapport à une cible de quatre points coplanaires formant un carré. La profondeur Z est constante et prise égale à sa valeur désirée Z^* . Par conséquent, aucun modèle 3D de la cible est nécessaire. Les vitesses de translation et de rotation de la caméra sont respectivement contraintes à ± 25 cm/s et à ± 0.25 rad/s. La période d'échantillonnage est fixée à 40ms, correspondant à une cadence vidéo de 25 images/s. Des erreurs de modélisation sont introduites dans les modèles de prédiction (10) et (11) sur les paramètres intrinsèques de la caméra. Un bruit blanc gaussien est également ajouté en sortie pour simuler des erreurs dues au traitement d'images.

Dans toutes les simulations présentées (réalisées sous Matlab), le code de couleur suivant est utilisé :

- bleu pour le contrôleur $AV2D_P$;
- vert pour le contrôleur $AV2D_C$;
- rouge pour le contrôleur $AV2D_S$.

Le signal de commutation est représenté en magenta sur les figures décrivant l'évolution du torseur cinématique de la caméra. Lorsque le signal de commutation est égal à 0.3 (resp. -0.3), le contrôleur $AV2D_P$ (resp. $AV2D_C$) est sélectionné.

4.1 Rotation pure autour de l'axe optique

La première configuration étudiée est une rotation de 1.4 radians autour de l'axe optique de la caméra.

Sans contrainte de visibilité. Toutes les erreurs dans le plan image convergent vers zéro (voir Fig. 4). Comme attendu, le contrôleur $AV2D_P$ est utilisé durant toute la simulation. Ce choix se justifie car le contrôleur $AV2D_C$ est bien connu pour générer dans cette configuration un déplacement inutile (*camera retreat*). Les trajectoires des primitives visuelles obtenues avec le contrôleur $AV2D_S$ sont alors superposées à celles obtenues avec le contrôleur $AV2D_P$. Ces trajectoires dans le plan image sont circulaires, conformément à la trajectoire 3D réalisée par la caméra.

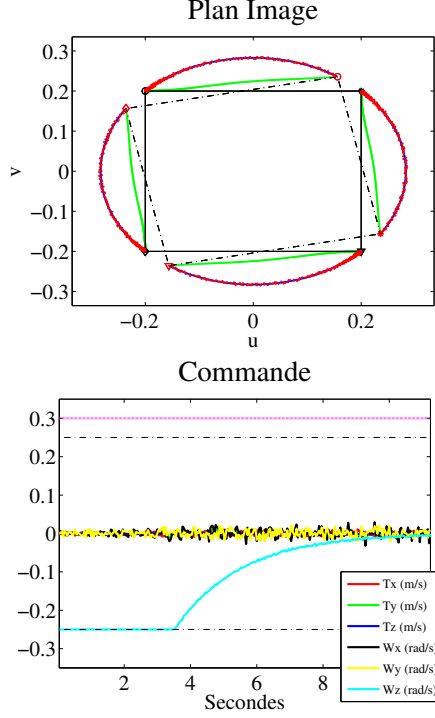


FIGURE 4. Rotation pure autour de l'axe optique sans contraintes de visibilité

Avec contrainte de visibilité. Afin d'illustrer les performances et l'efficacité du contrôleur $AV2D_S$, des contraintes visuelles sont ajoutées. La taille de l'image étant fixée à ± 0.3 , une zone de sécurité est définie dans le plan image par les bornes suivantes : $u^- = v^- = -0.25$ et $u^+ = v^+ = 0.25$. On constate (voir Fig. 5) que les primitives visuelles convergent vers les primitives désirées tout en satisfaisant les contraintes visuelles. Plusieurs commutations ont été nécessaires durant la simulation. Si le contrôleur $AV2D_P$ semble optimal d'un point de vue de la trajectoire de la caméra, les primitives visuelles peuvent sortir de la zone de sécurité. Dans ce cas, une commutation vers le contrôleur $AV2D_C$ permet d'assurer des trajectoires quasi rectilignes des primitives dans l'image, et donc par conséquent, d'assurer implicitement la satisfaction des contraintes visuelles. On remarque alors un léger déplacement de la caméra le long de l'axe optique. Cette translation, indispensable pour garantir la visibilité des primitives, est de 8cm contre 14cm dans le cas où seul le contrôleur $AV2D_C$ aurait été utilisé durant toute la simulation.

4.2 Translations

Dans cette simulation, la caméra doit effectuer des translations suivant les axes X , Y et Z . Comme mentionné

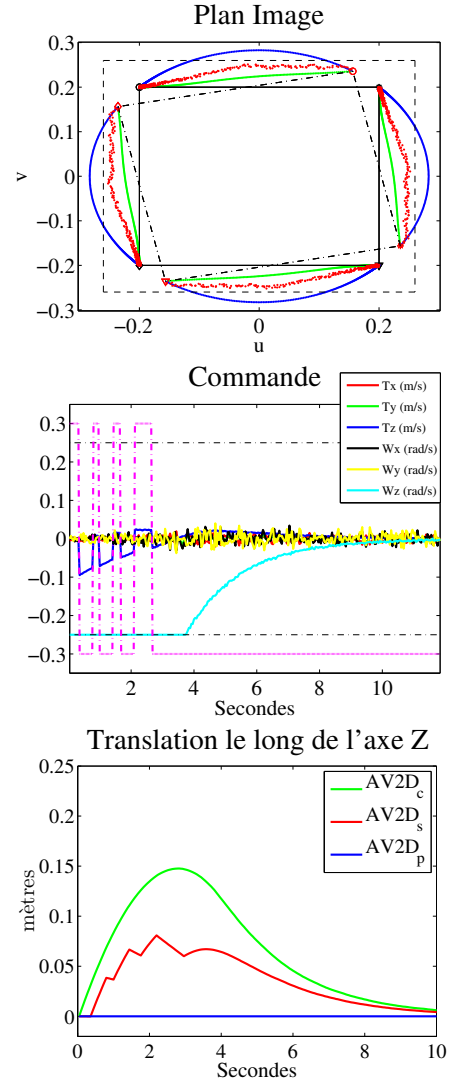


FIGURE 5. Rotation pure autour de l'axe optique avec contraintes de visibilité

précédemment, le contrôleur $AV2D_C$ assure des trajectoires de la caméra optimales dans l'espace 3D (voir Fig. 6(a)-6(c)). Le contrôleur $AV2D_S$ utilise le contrôleur $AV2D_C$ durant toute la simulation. Étant donné que $Z = Z^*$, les trajectoires dans le plan image et dans l'espace 3D tendent vers des droites.

4.3 Déplacement quelconque

Le mouvement que doit réaliser la caméra pour que l'erreur dans l'image converge vers zéro est une combinaison de translations et de rotations suivant tous les axes. On remarque (voir Fig. 6(d)-6(f)) que les trajectoires de la caméra dans l'espace 3D obtenues avec le contrôleur $AV2D_S$ sont plus directes que celles obtenues avec les contrôleurs $AV2D_C$ ou $AV2D_P$. Le déplacement de la caméra est optimisé : les déplacements inutiles sont minimisés. Les trajectoires obtenues dans le plan image satisfont alors un compromis entre des trajectoires optimales des primitives et un déplacement de la caméra le plus direct possible. Bien que la loi de commande générée par le contrôleur $AV2D_S$ ne soit pas continue, il est important de noter que la commande est appliquée en tant que consigne pour les contrôleurs bas niveau des articulations du système robotique. Par conséquent, les brusques varia-

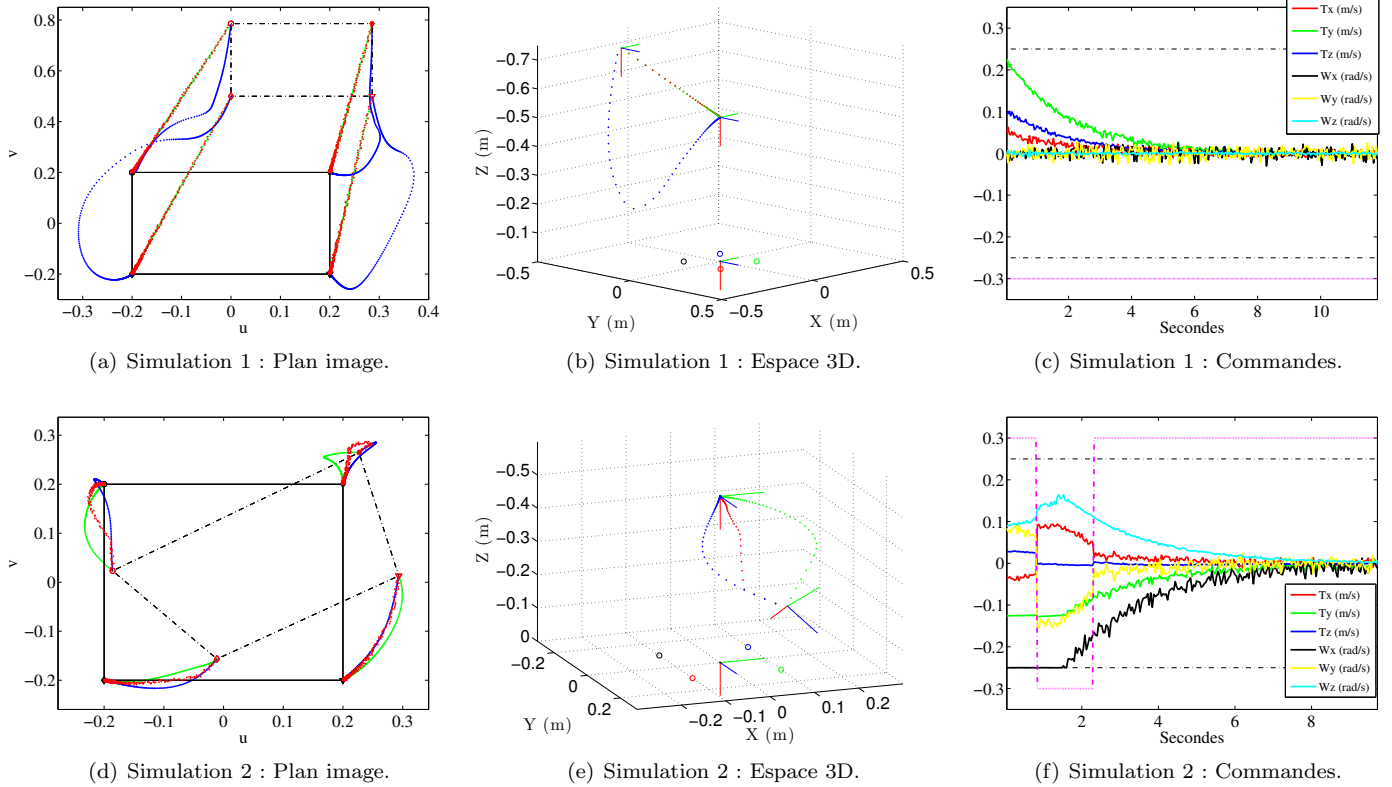


FIGURE 6. Simulation 1 : translations pures. Simulation 2 : déplacement quelconque.

tions sont atténuées comme cela a été montré en pratique dans Gans et Hutchinson (2007). Le temps moyen de calcul de la prédiction du mouvement de la caméra pour les deux contrôleurs est d'environ 20ms à chaque itération et peut être largement réduit en utilisant un langage de programmation adapté (langage C) pour une application temps réel sur un système robotique.

5. CONCLUSIONS

Un contrôleur à commutation combinant les avantages des contrôleurs $AV2D_C$ et $AV2D_P$ a été développé pour améliorer les performances de l'asservissement visuel 2D. Le contrôleur $AV2D_S$ proposé assure la convergence des primitives dans l'image tout en optimisant le déplacement de la caméra. La décision de commuter vers l'un ou l'autre contrôleur est prise en fonction de critères reflétant le déplacement prédit de la caméra pour les deux contrôleurs. Il a été prouvé que le système bouclé avec le contrôleur $AV2D_S$ est localement asymptotiquement stable, et ce quel que soit le signal de commutation. Des résultats de simulation montrent les performances et la robustesse du contrôleur $AV2D_S$ en présence de contraintes de visibilité, de perturbations et d'erreurs de modélisation.

RÉFÉRENCES

- Allibert, G., Courtial, E., et Chaumette, F. (2010). Predictive control for constrained image-based visual servoing. *IEEE Trans. on Robotics*, 26(5), 933–939.
- Chaumette, F. (1998). Potential problems of stability and convergence in image-based and position-based visual servoing. *The Confluence of Vision and Control, Lecture Note in Control and Informations Systems*, Springer-Verlag, 237, 66–78.
- Chaumette, F. (2004). Image moments : a general and useful set of features for visual servoing. *IEEE Trans. on Robotics*, 20(4), 713–723.
- Chaumette, F. et Hutchinson, S. (2006). Visual servo control, part i : Basic approaches. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 13(4), 82–90.
- Chaumette, F. et Hutchinson, S. (2007). Visual servo control, part ii : Advanced approaches. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 14(1), 109–118.
- Chesi, G. et Vicino, A. (2004). Visual servoing for large camera displacements. *IEEE Trans. on Robotics*, 20(4), 724–735.
- Corke, P., Spindler, F., et Chaumette, F. (2009). Combining cartesian and cylindrical coordinates in ibvs. In *IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, 5962–5967. St Louis, USA.
- Deng, L., Janabi-Sharifi, F., et Wilson, W. (2005). Hybrid motion control and planning strategies for visual servoing. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 52(4), 1024–1040.
- Folio, D. et Cadenat, V. (2008). Dealing with visual features loss during a vision-based task for a mobile robot. *International Journal of Optomechatronics*, 2(3), 185–204.
- Gans, N. et Hutchinson, S. (2007). Stable visual servoing through hybrid switched-system control. *IEEE Transactions on Robotics*, 23(3), 530–540.
- Iwatsuki, M. et Okiyama, N. (2002). A new formulation of visual servoing based on cylindrical coordinate system with shiftable origin. In *IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, 354–359. Lausanne, Switzerland.
- Liberzon, D. (2003). *Switching in Systems and Control*. Birkhauser, ISBN 0-8176-4297-8.